

博士論文

2017 年度(平成 29 年度)

電気光学結晶を用いた楕円偏光
テラヘルツ電場ベクトル波形の測定とその解釈

慶應義塾大学大学院・理工学研究科

基礎理工学専攻 物理学科

小口 研一

報告番号	甲 乙 第	号	氏 名	小口 研一
主 論 文 題 目 : 電気光学結晶を用いた楕円偏光テラヘルツ電場ベクトル波形の測定とその解釈				
<p>(内容の要旨) テラヘルツ周波数帯では、テラヘルツ時間領域分光法(Terahertz time-domain spectroscopy; 以下、THz-TDS)を用いた光電場の時間波形計測が盛んに行われている。同分光法を用いると、試料を透過したテラヘルツ光電場の時間波形をフーリエ変換し、試料がないときの参照信号と比較することで、クラマース・クロニッヒ変換を用いることなく試料の複素屈折率を測定することができる。そのため様々な物性計測への応用が期待され、行われてきた。また近年では、THz-TDS の手法を拡張し、偏光情報も含めた電場ベクトル波形計測を行うことによって、試料の複素屈折率の異方性を調べる取り組みも行われている。</p> <p>THz-TDS における代表的な光電場強度検出法として、電気光学(electro-optic : EO) サンプリング法が知られている。この手法は、EO 結晶内での非線形光学効果を通じて、検出が難しいテラヘルツ周波数帯の情報を、検出が容易な近赤外光周波数帯の情報へと転写することで、テラヘルツ光電場を計測する手法である。最近では、同手法を用いることで、テラヘルツ光電場の大きさだけでなく、その向き(偏光情報)も含めた電場ベクトル波形を計測できることが示され、様々な分光応用が進められている。</p> <p>しかし、EO サンプリング法では、周波数の異なるテラヘルツ光と近赤外プローブ光が EO 結晶内部を異なる速度で進む為、EO 結晶内部でプローブ光と相互作用するテラヘルツ電場ベクトルの大きさと向きが時々刻々と変化してしまうという、いわゆる「位相不整合」の問題がある。この位相不整合が起こるために、一般に、計測された波形は空气中を伝搬してきたテラヘルツ電場ベクトル波形を正確に再現しない。この問題は EO サンプリング法の開発当初から認識されており、先行研究では位相不整合による影響を除去することで、測定した時間波形から正確なテラヘルツ光電場波形を復元した。一方で、より位相不整合の影響が複雑に関与するベクトル時間波形については、正確な光電場ベクトル波形を復元する手法は確立していなかった。</p> <p>そこで本論文では、EO サンプリング法で計測されるベクトル時間波形を解釈することで、電場ベクトル時間波形を正確に復元する方法の確立を目指して、理論構築・実験検証を行った。その結果、測定したベクトル時間波形を周波数解析すれば、テラヘルツ光の各周波数成分の正確な偏光状態が復元できることが分かった(第3章)。また、EO 結晶の屈折率などの情報を考慮することで、正確なテラヘルツ光電場ベクトル時間波形の復元に成功した (第4章)。さらに、以上の手法について、結晶対称性の異なる様々な EO 結晶を用いても、同様に偏光計測できることを示した (第5章)。</p> <p>本論文で提案する方法論は、電磁波の伝搬を記述する普遍的な Maxwell 方程式を基本としたものであるから、テラヘルツ周波数領域の光電場ベクトル時間波形の検出だけではなく、中赤外光や近赤外光などの様々な周波数帯での光電場ベクトル時間波形計測へと応用することが可能な重要な成果である。</p>				

Thesis Abstract

No. _____

Registration Number:	<input checked="" type="checkbox"/> "KOU" <input type="checkbox"/> "OTSU" No. _____ *Office use only	Name:	Kenichi Oguchi
Title of Thesis: Measurement and interpretation of elliptically-polarized terahertz electric field vector waveform using electro-optic crystals			
<p>Summary of Thesis: In terahertz frequency range, terahertz time-domain spectroscopy (THz-TDS), has been actively conducted so far. By using this method, it is possible to directly measure the complex refractive index of samples by comparing between the Fourier components of the terahertz time-domain waveform measured with and without samples without utilizing the Kramers-Kronig relation. Recently, efforts have been devoted to investigate the anisotropy in the complex refractive index of samples by measuring the electric field (E-field) "vector" waveform of the terahertz optical pulse.</p> <p>An electro-optic (EO) sampling method is well known as a representative terahertz E-field waveform detection method in THz-TDS. In this method, a terahertz E-field waveform is measured by transferring information of the terahertz pulse which is difficult to detect to information of near-infrared probe pulse which is easily detected with a nonlinear optical effect in EO crystals. Recently, it has been demonstrated that E-field vector waveform including not only its magnitude but also its direction can be measured by using the EO sampling method.</p> <p>However, in the EO sampling method, it is widely known that there is a so-called "phase mismatch" problem, which originates from the difference in the travel velocity inside the EO crystals between the terahertz and the near-infrared probe pulses. As a result, because the magnitude and direction of the terahertz E-field vector sensed by the probe pulse within the EO crystal varies at different positions and times, the measured waveform does not accurately reproduce the propagated terahertz E-field vector waveform. This problem has been discussed since the development of the EO sampling method, and in the previous research, it succeeded to reproduce the accurate terahertz E-field waveform from the measured time-domain waveform by appropriately accounting for the phase mismatch effect. On the other hand, a method for retrieving an accurate terahertz E-field vector waveform has not been established.</p> <p>In this PhD-thesis, we propose a methodology to interpret the time-domain waveform measured by the EO sampling method including the polarization information, and demonstrate the retrieval of the terahertz E-field vector time-domain waveform. By analyzing the measured vector time-domain waveform in the frequency domain, it is possible to restore the exact polarization state of each frequency component of terahertz pulse (Chapter 3). Considering the material parameter of the EO crystals such as the refractive index, it was proven that an accurate terahertz E-field vector time-domain waveform can be retrieved (Chapter 4). Furthermore, we shown that the terahertz E-field vector can be measured even if various kinds of EO crystals with different crystal symmetry are used (Chapter 5).</p> <p>Since the methodology proposed in this thesis is based on the universal Maxwell equation describing the propagation of electromagnetic waves, it can be applied to detect the E-field vector waveform not only in terahertz frequency range but also in various frequency ranges.</p>			